DOI: 10.22067/jfcei.2022.73899.1097

ارائه مدل پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از مقادیر شاخص بین‌المللی ناهمواری مطالعه موردی آزادراه‌های منتخب ایران*

مقاله پژوهشی

سیدعظیم حسینی (۱) مسعود صبائی (۲) سید امیر سعادتجو (۳) سید سعید فاطمی (۴) سید علی ضیائی (۵)

چکیده *یکی از مؤلفه‌های مهم در یک سیستم مدیریت رو سازی و برنامه‌ریزی منابع مالی جهت ترمیم و نگهداری آن‌ها، ارزیابی قابل اعتماد و دقیق از و ضع موجود شبکه روسازی است که شامل محاسبه پارامترهای خدمت رسانی مانند شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) و شاخص وضعیت روسازی (PCI)، در طول دوره عملکرد روسازی می‌باشد. محاسبه میدانی شاخص PCI و تا حدودی شاخص IRI کمی دشوار و پیچیده است. لذا استفاده از مدل‌های عددی جهت تخمین این پارامترها ضرورت دارد. در این مطالعه، مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص‌های PCI و IRI مربوط به پنج آزادراه مختلف در ایران مورد ا ستفاده قرار گرفت و دقت ارزیابی مدل‌های مختلف ریا ضی ارائه شده در نقاط مختلف جهان بر روی آن‌ها برر سی گردید. سپس برای پیش بینی داده‌های PCI با ا ستفاده از مقادیر ورودی IRI، یک مدل ریا ضی جدید معرفی گردید. نتایج برر سی دقت پیش بینی مدل‌ها ن شان داد برای تمامی آزادراه‌های مورد مطالعه، مدل پی شنهادی از تمام مدل‌هایی که تا کنون توسط محققین مختلف در دنیا ارائه شده‌است عملکرد بهتری از خود نشان داد. استفاده از این مدل می‌تواند پیش بینی پارامتر PCI با استفاده از مقادیر ورودی شاخص IRI را برای شبکه آزادراهی کشور میسر سازد و مدیریت روسازی آزادراه‌ها و برنامه ریزی عملیات ترمیم و نگهداری آن‌ها را با هزینه کم‌تری تسهیل نماید.*

واژه‌های کلیدی شاخص وضعیت روسازی، شاخص بین‌المللی ناهمواری، مدیریت روسازی، ترمیم و نگهداری.

مقدمه

شبکه جاده‌ای موجود در هر کشوری یکی از عناصر اصلی رشد و توسعه آن می‌باشد. تردد وسایل نقلیه و تأثیر شرایط جوی (تابش خورشید و ریزش‌های جوی) در طول عمر بهره‌برداری، روسازی‌ها به طور مداوم فرسایش می‌یابد. کاهش کیفیت سطح روسازی و شکل‌گیری خرابی‌ها موجب کاهش سطح خدمت‌رسانی راه و افزایش هزینه کاربران می‌گردد. از این‌رو تصمیمات مربوط به زمان‌بندی عملیات ترمیم و نگهداری، بهسازی و یا بازسازی روسازی چالش بزرگی برای ارگان‌های مدیریت راه‌ها در سراسر جهان می‌باشد. در همین راستا بسیاری از ارگان‌ها با هدف حفظ شبکه روسازی، استفاده از روش‌های مختلف نگهداری در زمان مناسب را در برنامه خود قرار دادند [1]. چنین شیوه‌هایی معمولاً تحت تأثیر بسیاری از عوامل از جمله کمبود اطلاعات وضع موجود روسازی، کمبود تخصص جهت تعیین روش ترمیم و نگهداری متناسب با وضع موجود و محدودیت‌های نیروی انسانی و مالی قرار می‌گیرد [2].

ارزیابی قابل اعتماد و دقیق از وضع موجود شبکه روسازی یکی از مؤلفه‌های مهم در یک سیستم مدیریت روسازی (Pavement Management System (PMS)) می‌باشد. این ارزیابی از طریق بازرسی چشمی مستمر وضعیت خدمت‌رسانی روسازی حاصل می‌گردد. به عنوان نمونه میزان ترک خوردگی سطح روسازی، از طریق رتبه بندی سطح و خرابی‌های غالب هر قطعه از شبکه روسازی ارزیابی می‌شود [3]. با این وجود، شرایط و عملکرد کامل روسازی فراتر از ارزیابی خرابی‌های سطح آن است. همچنین عوامل دیگر مانند کیفیت سواری، ظرفیت ساختاری و اصطکاک سطح از اجزای مهم برای یک سیستم مدیریت روسازی با کیفیت خدمت‌رسانی قابل قبول هستند.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران. **Email:** azim_hosseini@azad.ac.ir
(۲) دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.
(۳) دانشجوی دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
(۴) دکتری عمران گرایش راه‌وترابری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(۵) استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

ارزیابی عملکرد روسازی جهت تعیین استراتژی‌های نگهداری آن، با استفاده از شاخص‌های مختلفی مانند رتبه بندی وضعیت روسازی ((Pavement Condition Rating (PCR)، شاخص وضعیت روسازی ((Pavement Condition Index (PCI)، رتبه بندی قابلیت خدمت‌رسانی فعلی (Present Serviceability Rating (PSR))، شاخص بین المللی ناهمواری (IRI) ((International Roughness Index (IRI) و غیره انجام می‌پذیرد [4].

در حال حاضر، کیفیت سواری به عنوان عنصر اساسی عملکرد روسازی و رضایت‌مندی کاربران در نظر گرفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت سواری و دیدگاه کاربران در مورد سطح خدمت‌رسانی جاده، میزان ناهمواری سطح روسازی است. افزایش ناهمواری‌ها سبب کاهش کارایی خودروها، افزایش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. همچنین ممکن است منجر به کاهش ایمنی محور شود. این امر می‌تواند سالانه موجب هدرروی مقدار قابل توجهی از منابع مالی گردد. میزان ناهمواری روسازی را می‌توان از طریق تعیین شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) ارزیابی نمود. این شاخص برابر با مجموع حرکت‌های عمودی تقسیم بر مسافت طی شده خودرو پیمایش با سرعت عبوری ۸۰ کیلومتر در ساعت می‌باشد که پروفیل حرکت آن از طریق یک مدل ریاضی محاسبه می‌گردد. در طراحی روسازی به روش مکانیکی – تجربی ((MEPDG) Mechanistic-Empirical Pavement Design)، از طریق تابعی از مقدار IRI اولیه ((Initial IRI (IRI_o) (دقیقاً پس از ساخت روسازی)، فاکتور منطقه (SF)، میزان ترک‌های پوست سوسماری، طول ترک‌های عرضی و متوسط میزان شیارشدگی، مقدار IRI نهایی را با میزان همبستگی ۰٫۵۶ (جامعه آماری ۱۹۲۶ قطعه) پیش‌بینی می‌نماید. این روش مبتنی بر پایگاه داده‌های عملکرد بلند مدت روسازی (LTPP) (Long-Term Pavement Performance (LTPP) است [5]. بسیاری از ارگان‌های مدیریت روسازی در سراسر جهان مقدار اولیه IRI را به عنوان یک معیار تضمین کیفیت و مقدار IRI نهایی را به عنوان شاخصی مهم جهت تعیین زمان مناسب برای انجام عملیات ترمیم و نگهداری و یا بازسازی روسازی در نظر می‌گیرند [6,7]. همچنین در بسیاری از ارگان‌ها کیفیت خدمت‌رسانی راه‌ها را بر اساس مقادیر IRI طبقه بندی نموده‌اند. مقادیر مجاز IRI (پس از ساخت) جهت طبقه بندی عملکردی مختلف جاده‌ها در کشورهای مختلف، در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) طبقه‌بندی کیفیت خدمت‌رسانی روسازی در کشورهای مختلف را بر اساس مقادیر IRI نشان داده شده است.

در سال ۲۰۰۰ ارتباط بین شاخص IRI و خرابی‌های شیارشدگی و ترک‌خوردگی بر مبنای بررسی میدانی ۳۱۷ محور واقع در ایالت نوادا، مورد ارزیابی قرار گرفت و طبق نتایج بدست آمده معادله (۱) با ضریب همبستگی ۰٫۷۱ جهت محاسبه مقدار IRI ارائه گردید [8].

$$IRI = 0.597\ (IRI_{init}) + 0.0094\ (Fatigue\ \%) + 0.00847\ (Rut\ Depth) + 0.382 \quad (۱)$$

IRI_{init}: میزان شاخص بین‌المللی اولیه

Fatigue : میزان ترک‌های پوست سوسماری

RutDepth : میزان شیارشدگی

جدول ۱ معیار وضعیت روسازی [7]

کشور	نوع راه	مقدار اولیه قابل قبول
دبی (ISO 2016)	آزادراه	۰٫۹۰
	راه‌های شهری	۱٫۰۰
	راه‌های جمع کننده	۱٫۲۰
استرالیا (Australroads 2017)	آزادراه	۱٫٦۰
	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۱٫۹۰
بلاروس (MTiKRB 2012)	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۱٫۵۰
	راه‌های درجه دو و سه	۲٫۰۰
	راه‌های درجه چهار و پنج	۲٫۵۰
مجارستان (MUT 2008)	راه‌های اصلی	۱٫۲۰
	راه‌های درجه یک و دو	۱٫۸۰
	راه‌های فرعی	۲٫۲۰
نروژ (NPRA 2014)	راه‌های اولیه	۲٫۰۰
	دیگر راه‌ها	۲٫۵۰
روسیه (MRRRF 2012)	بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی	۲٫۲۰
	راه‌های درجه دو و سه	۲٫۲۰
	راه‌های درجه چهار و پنج	۲٫٦۰
اسلواکی (MDVaRR 2012)	بزرگراه‌ها و آزادراه‌ها	۱٫۹۰
	راه‌های درجه یک و دو	۱٫۹۰
	راه‌های درجه سه و فرعی	۳٫۳۰

جدول ۲ گروه بندی وضعیت روسازی بر اساس شاخص IRI [7]

کیفیت روسازی	Sayers et al (1986) (Sayers 1984)	FHWA (2003) (Federal Highway Administration 2003) – بین شهری	FHWA (2003) (Federal Highway Administration 2003) – دیگر محورها	Cantisani (2010) (Cantisani and Loprencipe 2010)	INVIAS (2007) (Park, Thomas, and Wayne Lee 2007)	Goenaga et al. (2017) (Goenaga, Fuentes, and Mora 2017)
	مقدار قابل قبول IRI (m/km)					
خیلی خوب	کمتر از ۲	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱/۴۲	بین ۲ تا ۳/۵	کمتر از ۲/۸
خوب	بین ۲ تا ۳/۵	بین ۱ تا ۱/۵	بین ۱ تا ۱/۵	بین ۱/۴۲ تا ۲/۸۴	بین ۳/۵ تا ۴/۵	بین ۲/۸ تا ۳/۵
متوسط	بین ۳/۵ تا ۶	بین ۱/۵ تا ۱/۹	بین ۱/۵ تا ۲/۶۸	بین ۲/۸۴ تا ۴/۰۶	بین ۴/۵ تا ۶/۵	بین ۳/۵ تا ۴/۳
ضعیف	بزرگتر از ۸	بزرگتر از ۲/۷	بزرگتر از ۳/۴۷	بزرگتر از ۴/۰۶	بزرگتر از ۶/۵	بزرگتر از ۴/۳

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد می‌توان از شبکه عصبی مصنوعی جهت تخمین پروفیل راه استفاده نمود [9]. در سال ۲۰۰۳ ارتباط بین شاخص IRI و خرابی‌های روسازی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (back propagation Artificial Neural Network (ANN)) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد خرابی‌های چاله‌های شدید، لکه‌گیری و شیارشدگی بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار شاخص IRI دارند [10]. در سال ۲۰۱۳ یک شبکه عصبی مصنوعی جهت تخمین شاخص IRI با استفاده از نشانه وضعیت روسازی ارائه گردید. این مدل از سه ورودی، یک لایه مخفی همراه با چهار رشته عصبی و یک خروجی تشکیل شده است. ضریب همبستگی مدل پیشنهادی توسعه یافته ۰٫۸۶ می‌باشد که نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های انجام شده رضایت بخش بوده است [11].

در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ با استفاده از پایگاه داده شامل ۵۰۶ قطعه (۲۴۳۹ ارزیابی میدانی) یک مدل رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی، جهت پیش بینی IRI به صورت تابعی از خرابی‌ها ارائه شده است. مدل پیشنهادی تابعی از سن روسازی، مقدار IRI اولیه، شدت‌های مختلف ترک‌های عرضی، ترک‌های پوست سوسماری و میزان انحراف معیار میزان شیارشدگی است. ضریب همبستگی مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی به ترتیب ۰٫۵۷ و ۰٫۷۵ بوده است [12,13].

$$IRI = IRI_o + 0.01479 * Age + 0.00382 * (F.C)_{all} + 0.00053 * (T.C)_{all} + 0.08941 * SDRUT \quad (۲)$$

در این رابطه:

IRI_o: میزان شاخص بین المللی اولیه

Age: سن روسازی پس از ساخت و اجرای روکش

$F.C_{all}$: میزان ترک‌های پوست سوسماری

$T.C_{all}$: میزان ترک‌های عرضی

شاخص PCI پرکاربردترین معیار برای ارزیابی وضعیت روسازی در غالب کشورهای جهان است. این شاخص یک معیار جامع از شرایط روسازی موجود است که براساس خرابی‌های مشاهده شده و تجزیه و تحلیل آماری آن‌ها برای نمونه برداری از روسازی تبیین شده است و یکپارچگی ساختاری روسازی و وضعیت عملکردی سطح آن را نشان می‌دهد [14]. با این وجود، در عمل استفاده از آن دشوار است؛ زیرا در این شاخص ۱۹ نوع خرابی مختلف با سطوح متفاوت شدت (کم ، متوسط و زیاد) و در سطح گسترده‌تر بررسی می‌شود. داده‌های مورد استفاده برای تعیین PCI، از طریق بازرسی چشمی و یا روش بررسی مبتنی بر تصویر، جمع‌آوری می‌گردد. بازرسی چشمی مدت زمان طولانی طول می‌کشد و سبب اختلال در ترافیک می‌شود. همچنین برای محورهای طولانی و شبکه‌های بزرگ جاده‌ای مانند بزرگراه‌ها و آزادراه‌های چند خطه غیر عملی است و ممکن است شرایط ایمن برای بازرسان در حین عملیات برقرار نباشد. جهت اندازه‌گیری خرابی‌های مهم روسازی در سطح شبکه، فناوری‌های جدیدی مانند تصویرنگاری سطح روسازی از طریق عکس‌برداری یا تصویربرداری دیجیتال و اندازه‌گیری مشخصات روسازی با استفاده از حسگرهای غیرتماسی، ابداع شده است [15]. شایان ذکر است روش‌های بررسی مبتنی بر تصویر که در آن‌ها از وسیله نقلیه برای جمع آوری فیلم، فیلم یا تصاویر دیجیتالی از سیستم

روسازی استفاده می‌شود سریع‌تر و ایمن‌تر هستند اما به تجهیزات پیشرفته نیاز دارند و ممکن است هزینه‌بر باشند. از طرفی اندازه‌گیری شاخص بین‌المللی ناهمواری از لحاظ عملی راحت‌تر است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی با استفاده از حسگرهای لیزری مبتنی بر تصویربرداری سه بعدی، پروفیل طولی ناهمواری‌ها و پروفیل عرضی شیارشدگی سطح اندازه‌گیری می‌شود [16]. لذا در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده جهت پیش بینی میزان شاخص PCI با استفاده از مقدار IRI از طریق مدل های ریاضی و روش‌های عددی صورت گرفته است.

در سال ۲۰۰۲ جهت مدیریت روسازی در ایالت کالیفرنیا، یک رابطه ریاضـــی بین مقدار IRI و PCI ارائه گردید که در معادله (۳) نشان داده شده است [17].

$$IRI = 0.0171(153 - PCI) \quad , R^2=0.53 \qquad (۳)$$

در سال ۲۰۰۷ ارتباط بین PCI و IRI با استفاده از داده‌های مرتبط با محورهای بزرگراهی ۹ ایالت آمریکای شمالی (شامل ۲۰ قطعه) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل ارائه شده در معادله (٤) نشان داده شده است [18].

$$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right) \quad , R^2=0.59 \qquad (٤)$$

در سال ۲۰۱۵ برای راه‌های درون شهری پر ترافیک در کشور کلمبیا با طبقه‌بندی عملکردی و نوع روسازی متفاوت، مدل‌های پیش‌بینی نشانه وضعیت روسازی با توجه به مقدار IRI ارائه گردید. مدل‌های ارائه شده به‌همراه ضرایب همبستگی آن در جدول (۳) ارائه شده است [19].

در سال ۲۰۱۹ با استفاده از پایگاه داده‌های عملکرد بلند مدت روسازی، یک تابع حلقوی با ضریب همبستگی ۰,۹۹۵، جهت ایجاد ارتباط بین شاخص‌های PCI و IRI پیشنهاد گردید (معادله (۱۲)). در این راستا خرابی‌های اندازه گیری شده از ۱۲۰۸ قطعه با ۱۰۸٦۸ نقطه داده برای توسعه مدل پیش بینی نشانه وضعیت روسازی و ۲٤۰ قطعه با ۱۸۷٦ نقطه داده جهت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. اعتبارسنجی مدل با استفاده از مجموعه داده‌ها نشان داد میزان انحراف مقادیر IRI پیش بینی شده بسیار کم می‌باشد و مدل پیشنهادی (معادله (۱۲)) پیش‌بینی‌های بسیار دقیقی را به همراه داشته است ($R^2 = 0.992$) [20].

$$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061+\exp(0.048*PCI)}\right) \quad , R^2=0.995 \qquad (۱۲)$$

عادلی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ ارتباط بین شاخص‌های PCI و IRI برای راه‌های برون شهری را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش شامل ٦۰۰ کیلومتر از راه‌های استان فارس بوده است؛ پس از دسته بندی راه‌ها با توجه به وضعیت خدمت رسانی روسازی، مدل‌های رگرسیونی نمایی با ضریب همبستگی ۰,۷۵، ۰,۷٦ و ۰,۵۹ پیشنهاد گردید [21].

جدول ۳ روابط پیشنهاد شده برای محورهای مختلف در کشور کلمبیا [19]

نوع دسته بندی		مدل پیش بینی	ضریب همبستگی R^2
عملکرد محور	آزادراه	$(5) PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰,٥٦
	راه‌های درون شهری	$PCI = -0.206\ (IRI) + 114.15 \quad (6)$	۰,۷۱
	راه‌های جمع کننده	$PCI = -0.217\ (IRI) + 115.32 \quad (7)$	۰,۷۳
	راه‌های فرعی	$PCI = -0.186\ (IRI) + 110.31 \quad (8)$	۰,۷٤
نوع روسازی	بتن آسفالتی	$PCI = -0.224\ (IRI) + 120.02 \quad (9)$	۰,۸۲
	روسازی مرکب	$PCI = -0.203\ (IRI) + 113.73 \quad (10)$	۰,۷٥
	بتن سیمانی	$PCI = -0.172\ (IRI) + 110.01 \quad (11)$	۰,۷۲

شاخص IRI و PCI از جمله شاخص‌های وضعیت روسازی هستند که جهت ارزیابی وضعیت سطح روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اغلب شاخص‌های روسازی در نتیجه بکارگیری چندین مدل برای پیش‌بینی یک شاخص با استفاده از دیگر شاخص‌ها، ساخته شده‌اند. با وجود تلاش‌های صورت گرفته مدل‌های ارائه شده تنها بر اساس پایگاه‌های داده محدود انجام شده است و طیف گسترده‌ای از مقادیر IRI و PCI را نشان نمی‌دهد. همچنین دقت پیش بینی این مدل‌ها عمدتاً متوسط بوده است؛ لذا استفاده از این مدل‌ها برای محورهای مختلف بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های منطقه‌ای قابل اطمینان نمی‌باشد. از این‌رو ارزیابی مدل‌های ارائه شده جهت امکان سنجی استفاده از آن‌ها برای محورهای موجود در ایران ضروری می‌باشد. در این راستا در این پژوهش داده‌های مربوط به PCI و IRI پنج محور مختلف آزادراهی در کشور مورد بررسی قرار گرفته اند و مدل‌های عددی بین این دو پارامتر بررسی و ارائه شده است.

اهداف این پژوهش

ارائه برنامه زمان‌بندی منسجم و انتخاب عملیات ترمیم و نگهداری مناسب مطابق با وضع موجود روسازی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در سطح مدیریت روسازی راه‌ها می‌باشد. زمان طولانی مورد نیاز جهت برداشت وضع موجود روسازی و شرایط سخت تأمین ایمنی در محورهای بزرگراهی و آزادراه‌های چند خطه، لزوم دست‌یابی به روش‌های جایگزین جهت تعیین مقدار شاخص PCI را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این راستا تحقیقات موردی در مناطق مختلف جهان انجام شده و روابط ارائه شده از دقت متوسط برخوردار بوده است. با توجه به تمایز شرایط ارزیابی در کشورهای مختلف می‌بایست قبل از استفاده مستقیم روابط ارائه شده برای آزادراه‌ها و بزرگراه‌های موجود در ایران، یک راستی آزمایی مناسب انجام پذیرد. از این‌رو در این پژوهش مطالعه موردی ارزیابی مدل‌های ارائه شده برای آزادراه‌های موجود در ایران صورت گرفته است.

جمع‌آوری اطلاعات و روش انجام تحقیق

در راستای اهداف این پژوهش اطلاعات مربوط به مقادیر IRI و PCI اندازه‌گیری شده آزادراه‌های منتخب ایران از سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور تهیه گردید. در ادامه ارزیابی اولیه و پالایش داده‌ها انجام شد. سپس میزان دقت روابط ارائه شده در بخش‌های قبلی ذکر شده است برای داده‌های پالایش شده مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی‌های صورت گرفته یک رابطه یک مدل درجه ۵ برای پیش‌بینی بهتر محورهای مورد مطالعه پیشنهاد و میزان دقت آن تعیین گردید.

در ادامه برای مدل سازی داده‌ها از روش رگرسیون استفاده شده است. یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک «رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression)است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر پاسخ (Response Variable) با یک یا چند متغیر توصیفی (Explanatory Variable) برقرار می‌شود. البته گاهی به متغیر پاسخ، متغیر وابسته (Dependent Variable) و به متغیرهای توصیفی، متغیرهای مستقل(Independent Variables) نیز می‌گویند.

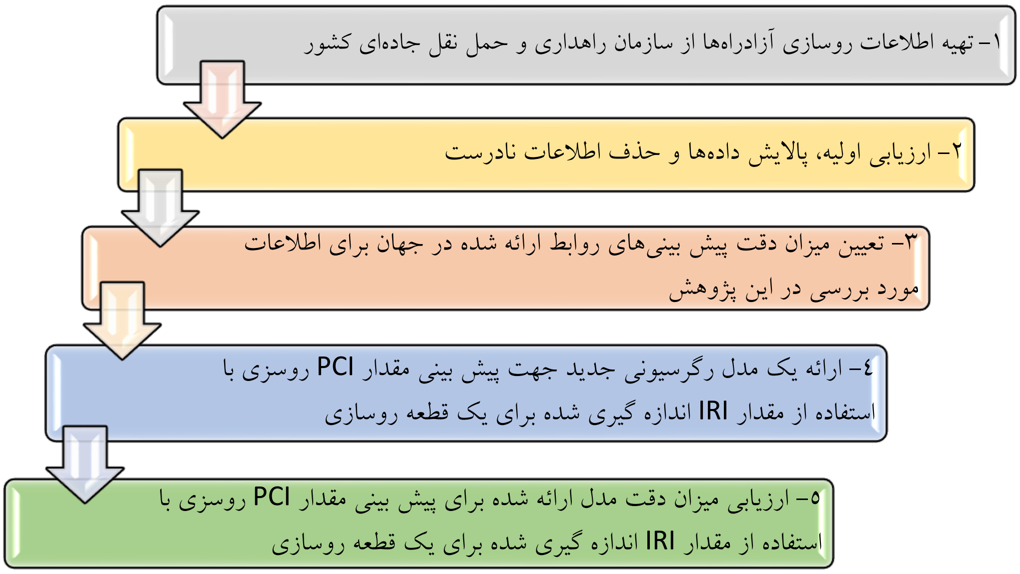
در رگرسیون خطی چندگانه، پارامترهای یک مدل خطی به کمک یه تابع هدف و مقدارهای متغیرها، برآورد می‌شوند. در رگرسیون خطی، مدل در نظر گرفته شده، یک رابطه خطی برحسب پارامترهای مدل است. به این ترتیب اگر nn مشاهده از متغیر مستقل pp بعدی XX داشته باشیم و بخواهیم یک رابطه خطی با متغیر پاسخ yy برقرار کنیم، می‌توانیم از مدل رگرسیون خطی زیر استفاده کنیم.

yi=β01+β1xi1+⋯+βpxip+εi,i=1,…,nyi=β01+β1xi1+⋯+βpxip+εi,i=1,…,n

(۱۳)

از آنجایی که متغیر مستقل XX دارای pp بعد است، مقدار آن را در هر بعد با یک متغیر مستقل یک بعدی جایگزین کرده‌ایم. مشخص است که اندیس ii نیز شماره مشاهده را نشان می‌دهد. در انتها نیز εε جمله خطای مدل رگرسیونی محسوب می‌شود [22,23].

فرآیند انجام پژوهش در فلوچارت زیر نشـــان داده شـــده است.



شکل ۱ فلوچارت فرآیند انجام پژوهش

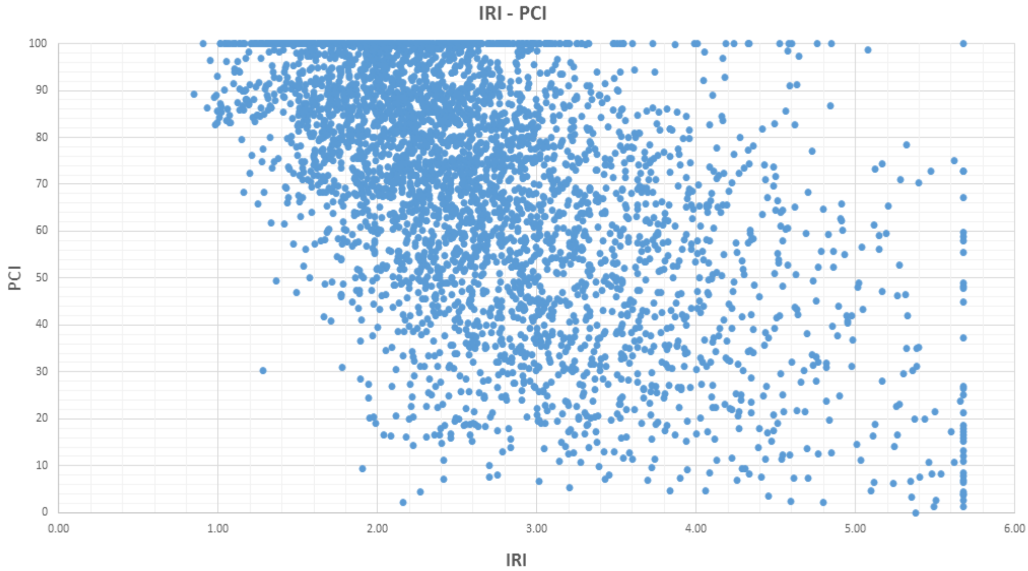
جدول ٤ داده‌های ورودی آزادراه تهران-زنجان

ردیف	کیلومتراژ ابتدا	کیلومتراژ انتها	PCI	IRI (in/mi)	IRI (m/km)
۱	۰/۲	۰/۷	۸٦/۱	۱٦۲/٦	۲/٥۷
۲	۰/۷	۱/۲	۹۱/۳	۱٦۲/٦	۲/٥۷
۳	۱/۲	۱/۷	۹۷/۸	۱۱۳/۱٥	۱/۷۹
٤	۱/۷	۲/۲	۷۹/۹	۱۲٥/۹٥	۱/۹۹
٥	۲/۲	۲/۷	۱۰۰	۱۳۰/٤٥	۲/۰٦
٦	۲/۷	۳/۲	۱۰۰	۱۲٦/۸٤	۲
۷	۳/۲	۳/۷	۱۰۰	۱۲۸/۰۷	۲/۰۲
۸	۳/۷	٤/۲	۱۰۰	۱۰٥/۸۸	۱/٦۷
۹	٤/۲	٤/۷	۸۹/۱	۱۱۰/۲٥	۱/۷٤
۱۰	٤/۷	٥/۲	۹۷/٦	/۱۱٥/۸۸	۱/۸۳
۱۱	٥/۲	٥/۷	۹۷/۹	۱۱۰/۹۳	۱/۷٥
۱۲	٥/۷	۷/۲	۹۳/۲	۱۱٥/۸۸	۱/۸۳
۱۳	٦/۲	٦/۷	۹٥/۳	۹۳/٦٥	۱/٤۸
۱٤	٦/۷	۷/۲	۱۰۰	۱۰۱/۱٦	۱/٦
۱٥	۷/۲	۷/۷	۹۸/٤	۱۰۰/۹۸	۱/٥۹
۱٦	۷/۷	۸/۲	۸٦/۹	۱۲٤/٦۳	۱/۹۷
۱۷	۸/۲	۸/۷	۹۱/۷	۱۲٦/٤۷	۲
۱۸	۸/۷	۹/۲	۸۳/۳	۱۲۷/۱٦	۲/۰۱
۱۹	۹/۲	۹/۷	۹۱/۸	۱۰۰/۳۳	۱/٥۸
۲۰	۹/۷	۱۰/۲	۷۱	۹۹/۲٤	۱/٥۷

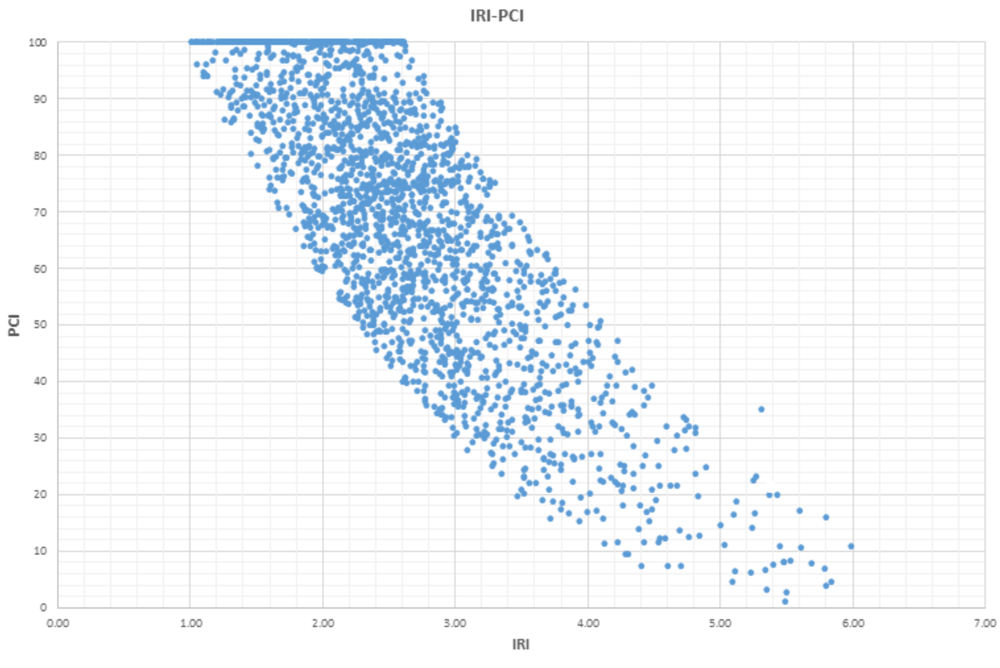
ردیف	کیلومتراژ	شاخص ناهمواری راست (m/km)	شاخص ناهمواری چپ (m/km)	شاخص ناهمواری متوسط (m/km)
۱	۰	٤/۲٦۷	٥/۳٥۹	٤/۸۱۳
۲	۰/۱	۲/۸٥	۳/۱۲	۲/۹۸٥
۳	۰/۲	۲/۰۳۷	۱/٥۰۲	۱/۷٦۹٥
٤	۰/۳	۲/۹۷	۲/۲۸۲	۲/٦۲٦
٥	۰/٤	۲/۷۱۳	۲/۰۸	۲/۳۹٦٥
٦	۰/٥	۲/۳۲۸	۱/۳۱۸	۱/۸۲۳
۷	۰/٦	۱/٦۷۷۲۷	۱/٦۳۰۹۱	۱/٦٥٤۰۹
۸	۰/۷۱	۲/۳٤٦٦۷	۲/٥۸	۲/٤٦۳۳۳
۹	۰/۸	۱/٥۳۸۱۸	۱/۹٦۷۲۷	۱/۷٥۲۷۳
۱۰	۰/۹۱	۱/٦۲۱۱۱	۲/۰۱	۱/۸۱٥٥٦
۱۱	۱	۱/٤۱۷	۱/۰٥۹	۱/۷۳۸
۱۲	۱۱/	۱/۸۳۱	۱/۷٥٦	۱/۷۹۳٥
۱۳	۱/۲	۱/۸۷۷۲۷	۱/۷۸۱۸۲	۱/۸۲۹٥٥
۱٤	۱/۳۱	۲/۸٤٤	۳/۰۹٦	۲/۹۷
۱٥	۱/٤۱	۱/۹٤٥٥٦	۱/۹۹٥٥٦	۱/۹۷۰٥٦
۱٦	۱/٥	۱/۸۰۱	۲/۱٤۱	۱/۹۷۱
۱۷	۱/٦	۱/٤۸۸	۱/۲۸۳	۱/۳۸٥٥
۱۸	۱/۷	۱/٦۲۱۸۲	۱/٦٦۲۷۳	۱/٦٤۲۲۷
۱۹	۱/۸۱	۲/۳٤۲	۲/۱	۲/۲۲۱
۲۰	۱/۹۱	۱/٦۳٥٥٦	۱/۲٤٦٦۷	۱/۹٤۱۱۱

جمع‌آوری پایگاه داده و پالایش اطلاعات

در راستای اهداف این پژوهش مقادیر IRI و PCI اندازه‌گیری شده برای سه آزادراه ایران شامل محورهای تهران-زنجان (رفت‌وبرگشت)، زنجان-تبریز (رفت‌وبرگشت) و کاشان-قم-نطنز (رفت‌وبرگشت) جمع‌آوری گردید. این اطلاعات شامل مقادیر PCI برای قطعات به طول ۵۰۰ متر و مقادیر IRI به ازای هر ۱۰۰ متر طول از محور بوده است. لذا جهت تقابل مناسب مقادیر IRI با PCI قطعه مورد نظر، میانگین IRI پنج داده متوالی به عنوان مقدار نماینده آن قطعه (۵۰۰ متر) در نظر گرفته شد. (جدول ٤). در ادامه اطلاعات بدست آمده مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها حاکی از پراکندگی زیاد اطلاعات و وجود خطاهای انسانی در اندازه‌گیری میدانی و محاسبه مقادیر شاخص‌ها بوده است. به همین منظور داده‌ها پالایش گردید و پس در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های (۲) و (۳)).



شکل ۲ تمامی داده‌های ورودی آزادراه‌های منتخب



شکل ۳ داده‌های ورودی پالایش شده

ارزیابی مدل‌های ارائه شده و ارائه مدل پیشنهادی

پس از پالایش داده‌های ورودی با استفاده از مدل‌های ارائه شده در مطالعات گذشته (معادله‌های (۳)،(۲)،(۱) و (۱۲)) که در بخش‌های قبلی ارائه شده است، مقادیر شاخص PCI با توجه به مقدار اندازه گیری شده شاخص IRI پیش‌بینی گردید. در ادامه میزان دقت پیش‌بینی‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص PCI، محاسبه گردید. نتایج بدست آمده در جدول (٥) ارائه شده است.

نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد رابطه (۱۲)، دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به دیگر رابطه‌ها داشته‌است و به ترتیب رابطه‌های (۳)، (۱) و (۲) پیش‌بینی‌های ضعیف‌تری داشته‌اند. به طور کلی با توجه به مقادیر ضریب همبستگی محاسبه شده روابط ارائه شده ضریب اطمینان پایینی ارائه داده‌اند. از این‌رو برای استفاده در محورهای مورد مطالعه مناسب نمی‌باشند.

جدول ٥ دقت پیش‌بینی مدل‌ها ارائه شده برای داده‌های پالایش شده

نام محور	شماره رابطه	رابطه	R^2	MSE	σ
تهران – زنجان	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	−۰/۲۰	٤٤۱/۱٦	۰/۲۷
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۹/۱٤	۳۷٤٤/۸۳	۰/۷۸
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	−۰/۱٥	٤۲٤/٤۲	۰/۲٦
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٦	۱۹۸/۹۹	۰/۱۸
زنجان – تهران	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/۱۱	٤۱۸/٥۸	۰/۲۷
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۸/۰۸	٤۲٦٥/۰٦	۰/۸۸
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/۲۸	۳۳۷/۹۲	۰/۲٥
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤۹	۲٤۰/۷۸	۰/۲۱
زنجان – تبریز	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/۲٥	۳۳۳/۹۸	۰/۳۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۱۳/۳۳	٦۳٥۳/۳٥	۱/۲۹
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/۳۷	۲۷۹/۱٤	۰/۲۷
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/۱۹	۳٥۷/۰۸	۰/۳۱
تبریز – زنجان	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/۰۳	٤٤٥/۱۹	۰/۳۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۱۲/٥۱	٦۲۳۱/٦۸	۱/۱٤
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/۱۷	۳۸۳/۲٤	۰/۲۸
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤۲	۲٦۹/۳٦	۰/۲٤
کاشان – قم – نطنز	۱	$PCI = 58.4795\ (IRI + 153)$	۰/۳۰	٥٦۷/۲۰	۰/٤۰
	۲	$\log(PCI) = 2 - 0.436 \log\left(\frac{IRI}{0.727}\right)$	−۱۰/٤۹	۹۲۹۲/٤۸	۱/٦۱
	۳	$PCI = -0.215\ (IRI) + 110.73$	۰/۰۳	۷۸٥/٦۲	۰/٤۷
	۱۲	$IRI = \left(\frac{79.933}{14.061 + \exp(0.048 * PCI)}\right)$	۰/٤٦	٤۳۳/۰٤	۰/۳٥

از آن‌جاکه روند ساخت و نگهداری روسازی در نقاط مختلف جهان متفاوت است، روند اضمحلال روسازی، نوع و شدت خرابی‌ها در محورهای مختلف نیز می‌تواند متغیر می‌باشد. تفاوت در نحوه اجرای عملیات روسازی، زمان‌بندی و روش‌های مختلف مورد استفاده در ترمیم و نگهداری، میزان پایبندی به برنامه‌ها، منابع مالی، شرایط آب و هوایی و توپوگرافی منطقه از جمله پارامترهای مؤثر بر نحوه مدیریت و نگهداری روسازی‌ها در کشورهای مختلف جهان می‌باشد. با توجه به شرایط ویژه ایران از لحاظ توپوگرافی، آب و هوا و تکنولوژی انتظار می‌رود روند اضمحلال روسازی راه‌ها نسبت به کشورهای دیگر متفاوت باشد. لذا طبیعی است که پیش‌بینی‌های انجام شده با استفاده از روابط پیشنهادی در دیگر کشورها، برای محورهای ایران از دقت کافی برخوردار نباشند. از این‌رو در این پژوهش با توجه داده‌های پالایش شده یک مدل پیش‌بینی درجه ۵ پیشنهاد شده است که در معادله (۱٤) ارائه می‌گردد.

$$PCI = -0.4609\ IRI^5 + 8.691\ IRI^4 - 61.26\ IRI^3 + 199.4\ IRI^2 - 319.8\ IRI + 292.7 \qquad (۱٤)$$

با استفاده از رابطه پیشنهادی مقادیر شاخص وضعیت روسازی با توجه به مقدار IRI اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی گردید. در ادامه میزان دقت پیش‌بینی‌ها نسبت به مقادیر PCI واقعی محاسبه و در جدول (٦) ارائه شده است.

جدول ٦ دقت پیش‌بینی مدل پیشنهادی برای داده‌های پالایش شده

محور مورد مطالعه	R^2	MSE	σ
آزادراه تهران – زنجان	۰,۵۷	۱۵۸,٦٦	۰,۱٦۱
آزادراه زنجان – تهران	۰,٦۳	۱۷۱,۹٦	۰,۱۷٦
آزادراه زنجان – تبریز	۰,۵۱	۲۱۷,۹۹	۰,۲٤۰
آزادراه تبریز – زنجان	۰,۵۷	۱۹٦,٦٤	۰,۲۰۲
آزادراه کاشان – قم – نطنز (رفت‌وبرگشت)	۰,۷۱	۲۳۳,۸۰	۰,۲۵٦

همان‌طور که در جدول (٦) مشاهده می‌شود مقادیر پارامترهای ضریب همبستگی، مجموع خطاها و انحراف معیار استاندارد برای محورهای مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر بوده‌است که نشان از رفتار مشابه در سیستم مدیریت روسازی در محورهای مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی مقدار میانگین ضریب همبستگی رابطه پیشنهادی تقریباً ۰,٦۰ بوده که حاکی از ضریب اطمینان قابل قبول پیش‌بینی‌ها است. البته ضریب همبستگی برای آزادراه کاشان – قم – نطنز (۰,۷۱) بوده‌است که نشان دهنده دقت مناسب پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد دقت اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها در ایران پایین است و داده‌های اندازه‌گیری شده نیازمند کنترل دقیق و پالایش می‌باشد. طبق نتایج ارزیابی‌های انجام شده نمی‌توان از روابط ارائه شده در نقاط مختلف جهان برای آزادراه‌های موجود در ایران استفاده نمود. شرایط خاص موجود در هر کشور از جمله خصوصیات منطقه‌ای و شرایط آب و هوایی، نحوه اجرای عملیات روسازی، برنامه زمان‌بندی و روش های مختلف مورد استفاده جهت ترمیم و نگهداری روسازی، میزان پایبندی به برنامه‌ها و منابع مالی موجب ایجاد تفاوت در کیفیت ساخت و نگهداری از روسازی راه‌ها می‌گردد. لذا روند تغییرات در مقادیر شاخص‌های نشان‌دهنده وضعیت روسازی در هر کشوری متفاوت خواهد بود. این امر موجب متمایز بودن ارتباط شاخص‌ها با یکدیگر در نقاط مختلف و لزوم انجام مطالعات موردی برای محور های موجود در هر منطقه خواهد بود تا بتوان روابط کاربردی با دقت و ضریب اطمینان بالاتری تعیین نمود.

اگرچه تعیین مقدار شاخص PCI با استفاده از مقادیر IRI اندازه‌گیری شده می‌توان بسیار مفید واقع گردد و در این راستا تلاش‌های بسیاری نیز انجام شده است؛ اما طبق بررسی‌های انجام شده ارتباط ریاضی قوی بین شاخص‌های IRI و PCI وجود ندارد. یکی از مهم‌ترین دلایل آن است که اگرچه دو شاخص بیانگر وضعیت کلی روسازی هستند اما به سبب تفاوت در نحوه محاسبه و پارامترهای تشکیل دهنده، ایجاد ارتباط ریاضی قوی بین آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. شاخص PCI شامل ترک‌های طولی و عرضی، ترک‌های پوست سوسماری و خرابی‌هایی چون قیرزدگی می‌شود که ممکن است موجب ایجاد ناهمواری محسوس در سطح روسازی نگردد و لذا در مقدار شاخص IRI تأثیر قابل توجهی نخواهند داشت. این درحالی است که خرابی‌های مذکور می‌توانند تأثیر بسزایی در مقدار مقدار شاخص

PCI داشته باشند. همچنین ممکن است میزان ناهمواری‌ها در قطعه‌ای از روسازی بالا باشد اما سطح روسازی عاری از ترک‌خوردکی باشد؛ در این صورت میزان ناهمواری‌ها تأثیر بسزایی در مقدار شاخص IRI دارد؛ در صورتی‌که در مقدار شاخص PCI تأثیر محسوسی نخواهد داشت. لذا برقراری ارتباط ریاضی با ضریب همبستگی قوی دور از انتظار خواهد بود. البته شایان ذکر است با توجه به جمیع موارد دست‌یابی به رابطه ریاضی با ضریب همبستگی ۰٫۶۰ می‌تواند مطلوب ارزیابی گردد و بتوان از آن در پیش‌بینی شرایط و تصمیم گیری در حوزه مدیریت روسازی استفاده نمود.

مراجع

1. Adeli, S, Salehfard, R., and Amini, B., "The Influence of Asphalt Mixture Components on Pavement Skid Resistance and Accident Rate in Urban Un-Signalized Intersections", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 43, pp 1–11 (2021).
2. Wotring, D. C., Baladi, G. Y., Buch, N., and Bower, S., "Pavement Distress and Selection of Rehabilitation Alternatives: Michigan Practice", *Transportation research record*, Vol. 1629(1), pp 214–25, (1998).
3. ASTM, D., "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys.", (2009).
4. Shah, Y. U., Devesh Tiwari, S. J., and Jain, M. K., "Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp 332–341 ,(2013).
5. Olidis, C., and Hein, D., "Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Materials Characterization: Is Your Agency Ready", *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Citeseer, (2004).
6. Perera, R. W, and S D Kohn., "Issues in Pavement Smoothness", NCHRP Web Document 42, (2002).
7. Robbins, M., and Tran, N., "A Synthesis Report: Value of Pavement Smoothness and Ride Quality to Roadway Users and the Impact of Pavement Roughness on Vehicle Operating Costs", *National Center for Asphalt Technology (NCAT) at Auburn University,* NCAT Report 16-03, pp 3–16, (2016).
8. Mactutis, J. A., Alavi, H., and Ott,W., "Investigation of Relationship between Roughness and Pavement Surface Distress Based on WesTrack Project", *Transportation research record*, Vol. 1699(1), pp 107–13, (2000).
9. Yousefzadeh, M., Azadi, S., and Soltani, A., "Road Profile Estimation Using Neural Network Algorithm", *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 24(3), pp 743–54, (2010).
10. Lin, J.D., Yau, J.T., and Hsiao, L.H., "Correlation Analysis between International Roughness Index (IRI) and Pavement Distress by Neural Network", *In 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Vol. ???, pp 12–16, (2003).
11. Vidya, R., Santhakumar, M., and Mathew, S., "Estimation of IRI from PCI in Construction Work Zones", *International Journal on Civil and Environmental Engineering*, Vol. 3(1), pp 1-5, (2013).
12. Abdelaziz, N., El-Hakim, R.T., El-Badawy, S., and Afify, H., "International Roughness Index Prediction Model for Flexible Pavements", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 21(1), pp 88–99, (2020).
13. El-Hakim, R.T., Abd, H., "Validation and Improvement of Pavement ME Flexible Pavement Roughness Prediction Model Using Extended LTPP Database", (2017).
14. Shahin, M., and Kohn, S., "Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets, and Parking

Lots. Volume I. Conditions Rating Procedure", Construction Engineering Research Lab Champaign, (1979).

15. Di Mascio, P., Piccolo, I., and Cera, L., "Automated Distress Evaluation", *In Proceedings of 4th International SIIV Congress*, Palermo, Italy, Vol. 17(2), pp12–14, (2007).
16. Wang, K., "Network Level Pavement Evaluation with 1 Mm 3D Survey System", *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, Vol. 2(6), pp 391–98, (2015).
17. Dewan, S.A., Smith, R.E., "Estimating IRI from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the Cities and Counties of San Francisco Bay Area", Transportation Research Record, (2002).
18. Park, K., Thomas, N.E., and Lee, K., "Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 133(12), pp 706–9, (2007).
19. Arhin, S.A., Williams, L., Ribbiso, A., and Anderson, M., "Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area", *Journal of Civil Engineering Research*, Vol. 5(1), pp 10–17, (2015).
20. Elhadidy, A., El-Badawy, H., and Elbeltagi, E., "A Simplified Pavement Condition Index Regression Model for Pavement Evaluation" *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 22(5), pp 1–10, (2019).
21. Adeli, S., "Development of a Relationship between Pavement Condition Index and International Roughness Index in Rural Road Network", Advances in Civil Engineering, (2021).
22. Gilani, V., Hosseinian, S.M., Behbahani, H., and Hamedi, G., "Prediction and Pareto-Based Multi-Objective Optimization of Moisture and Fatigue Damages of Asphalt Mixtures Modified with Nano Hydrated Lime", Construction and Building Materials 261 120509, (2020).
23. Behbahani, H., Hamedi, G., and Gilani, V., "Predictive Model of Modified Asphalt Mixtures with Nano Hydrated Lime to Increase Resistance to Moisture and Fatigue Damages by the Use of Deicing Agents", Construction and Building Materials 265: 120353, (2020).